



## **Il ruolo della robustezza strutturale nella impostazione ingegneristica della sicurezza antincendio**

**Crosti, C.; Giuliani, Luisa; Gentili, F.; e Bontempi, F.**

*Published in:*

Proceedings of the national conference Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali (VGR 2012)

*Publication date:*

2012

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*

Crosti, C., Giuliani, L., Gentili, F., & e Bontempi, F. (2012). Il ruolo della robustezza strutturale nella impostazione ingegneristica della sicurezza antincendio. In *Proceedings of the national conference Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali (VGR 2012)*

---

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

## **IL RUOLO DELLA ROBUSTEZZA STRUTTURALE NELLA IMPOSTAZIONE INGEGNERISTICA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO**

**Crosti, C.<sup>1</sup>, Giuliani, L.<sup>2</sup>, Gentili, F.<sup>3</sup> e Bontempi, F.<sup>4</sup>**

**1 Sapienza Università di Roma, via Eudossiana 18, chiara.crosti@uniroma1.it**

**2 Technical University of Denmark, lugi@byg.dtu.dk**

**3 Sapienza Università di Roma, via Eudossiana 18, filippo.gentili@uniroma1.it**

**4 Sapienza, Università di Roma, via Eudossiana 18, franco.bontempi@uniroma1.it**

### **SOMMARIO**

Tra le situazioni di rischio maggiormente temute dalla Società quelle legate all'azione incendio assumono giustamente un ruolo importante. Una fondamentale strategia per il controllo del rischio in caso di incendio per persone-beni-contesto, elementare nella sua enunciazione, consiste nel contrastare il più possibile la diffusione dell'incendio stesso. Questa strategia si applica a tutti i livelli: fra un locale e l'altro all'interno di un piano, fra un piano e l'altro all'interno di un edificio, fra un edificio e l'altro all'interno di un isolato, fino alla scala urbana e finanche regionale. Questa strategia di confinamento dello sviluppo dell'azione incendio trova la sua interpretazione strutturale nel tentativo di confinare quanto più possibile il danno strutturale conseguente all'azione stessa. Questa linea di difesa dal rischio incendio costituisce un approccio passivo di difesa. Essa è rimasta d'importanza fondamentale nel corso dello sviluppo storico della sicurezza in caso d'incendio, seppure affiancata da misure di protezione attive. La ragione di tale inalterata importanza è legata al fatto che, anche se approcci attivi possono essere più efficaci, la difesa passiva legata a caratteri strutturali risulta più affidabile e alle volte si presenta come ultima, se non unica, linea di difesa. A tale riguardo poi, in seguito allo specificarsi dei requisiti prestazionali delle costruzioni e con particolare coerenza all'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio, diventa importante analizzare e valutare le modalità di crisi di parti di struttura e di collasso più o meno esteso della stessa. In altri termini, l'eventuale collasso strutturale, pur accettabile, deve però avvenire con modalità tali da risultare non catastrofico e non diffusivo. In questo modo, il concetto di robustezza diventa centrale dal punto di vista della concezione strutturale. In termini generali, con robustezza strutturale si intende la proprietà di una struttura di mostrare un decremento di prestazioni non sproporzionato rispetto al danneggiamento iniziale causato da un evento eccezionale (in questo caso l'incendio). Si può quindi pensare ad una regolarità di sviluppo delle rotture all'interno di una costruzione in funzione della magnitudo dell'incendio. In questo contributo, nella prima parte si introducono la definizione e il significato di robustezza strutturale in termini generali e nei risvolti applicativi che riguardano la concezione della struttura, la sua analisi strutturale e il suo giudizio. Nella seconda parte, questi concetti sono applicati a due tipologie di costruzioni agli estremi, ovvero a) edifici industriali monopiano e b) ponte in acciaio. Per entrambe le categorie di strutture, saranno fornite indicazioni sulle differenti modalità di collasso, sia favorevoli sia sfavorevoli.

### **1.0 CRITERI DI PROGETTAZIONE PRESTAZIONALE**

La sicurezza e le prestazioni di una costruzione, o di una parte di essa, devono essere valutate in relazione agli Stati Limite che si possono verificare durante la sua vita nominale. In termini generali la sicurezza e le prestazioni della struttura in esame devono essere perciò verificati nei confronti di:

- Stati Limite Ultimi, che comportano perdita di equilibrio, collassi strutturali parziali o complessivi;
- Stati Limite di Esercizio, che comportano la fuori uscita dal regolare funzionamento della costruzione, impedendone le prestazioni per le quali era stata progettata.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 14/01/2008 [1] classificano l'azione incendio come eccezionale e stabiliscono che per tali classi di azioni *“la concezione strutturale, i dettagli costruttivi e i materiali usati dovranno essere tali da evitare che la struttura possa essere danneggiata in maniera sproporzionata rispetto alla causa”*, ovvero che la struttura possieda adeguata robustezza strutturale.

Il requisito di robustezza strutturale non è tuttavia sinonimo di invulnerabilità delle strutture: la sua definizione precisa, infatti, che la struttura non deve essere danneggiata in maniera sproporzionata rispetto

alla causa innescante quale incendio, esplosioni, urti, o anche, errori umani in fase di progetto, costruzione, manutenzione e utilizzo [2].

Dal punto di vista generico, la robustezza è un concetto sistemico: riguarda quindi come è organizzato il sistema strutturale, più che come sono fatte le varie parti strutturali. Per tale motivo, le verifiche di robustezza non possono essere condotte a livelli sezionali o di elemento, ma a livello globale, chiamando in causa la risposta dell'intero organismo strutturale; la robustezza dei singoli elementi della struttura, infatti, non è garanzia della robustezza della struttura nel suo complesso. Non soltanto una struttura che ha elementi robusti può non essere robusta, ma anche il viceversa non è in generale valido, in altre parole l'alto grado di robustezza di determinati elementi o parti di elementi può in determinati casi giocare a sfavore della robustezza del sistema [3].

Al fine di garantire un buon livello di robustezza e' necessario garantire dei percorsi alternativi di carico un adeguato grado di duttilità, iperstaticità e ridondanza, distribuiti su tutta la struttura.

## **2.0 STRATEGIE DI PROGETTO NEL CASO DI AZIONI ECCEZIONALI**

Il Progettista, per affrontare un'azione eccezionale che cimenta l'opera, può considerare le seguenti strategie [4]:

- a) ridurre la probabilità che l'azione avvenga o ridurne l'intensità, attuando la cosiddetta prevenzione, ovvero implementando nel caso specifico misure, provvedimenti e accorgimenti atti a ridurre al minimo la probabilità dell'insorgere dell'incendio;
- b) ridurre gli effetti dell'azione sulla struttura, operando così in termini di protezione;
- c) progettare e realizzare una struttura in grado di sopportare senza danni l'azione;
- d) limitare il grado di danneggiamento della struttura a seguito dell'accadimento dell'azione;
- e) mitigare le conseguenze del collasso (mitigazione).

In termini generali, le strategie a), b), ed e), sono misure non strutturali: esse possono essere adottate efficacemente proprio nel caso di azioni eccezionali quali l'incendio. Sono le strategie di protezione attiva, richiamate prima con riferimento al documento ISO 13387 [5], dove per protezione attiva si intende specificatamente l'insieme delle misure che vengono adottate al fine di ottenere lo spegnimento dell'incendio durante la sua fase iniziale.

Tali misure comprendono sia l'impiego d'impianti tecnologici, come sistemi di rilevazione automatica, sistemi di allarme, evacuatori di fumo, ordinari impianti di estinzione (idranti e estintori), sistemi di spegnimento automatico (sprinkler), sia l'adozione di scelte progettuali e di un'opportuna programmazione organizzativa che rende veloce l'evacuazione dell'edificio e sicuro e tempestivo l'intervento delle squadre di soccorso.

Le strategie c) e d), sono invece misure strutturali, dette anche misure di protezione passiva. La c) prevede un comportamento nominale e reversibile della struttura sotto l'azione, mentre la d) ammette lo sviluppo di crisi locali e proporzionali all'intensità dell'incendio: questa correlazione positiva fra effetto (danno) e causa (incendio) è legato al requisito di robustezza strutturale.

In altre parole le tecniche di protezione passiva sono l'insieme delle misure che vengono adottate per ridurre al minimo i danni dell'edificio durante la fase di incendio generalizzato intervenendo sulla resistenza della struttura e sul suo comportamento strutturale. Le tecniche di protezione attiva invece sono quelle tecniche che prevedono l'individuazione, la segnalazione e quindi la relativa estinzione dell'incendio durante la sua fase iniziale: il loro corretto funzionamento riduce l'andamento della temperatura  $T$  in funzione del tempo  $t$  dalla curva rossa alla curva blu di Figura 1.

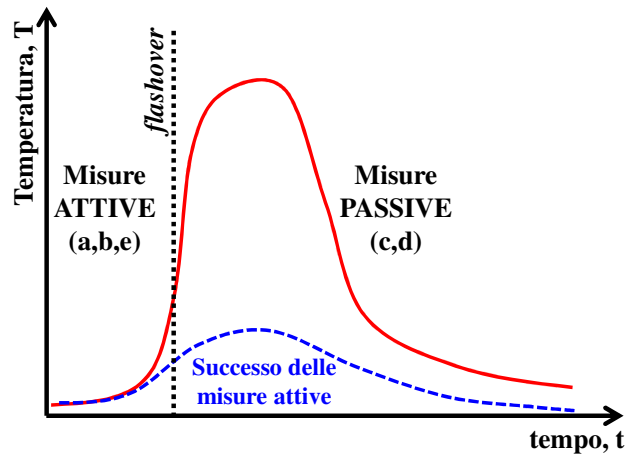


Figura 1. Andamento della temperatura  $T$  in funzione del tempo  $t$  e distinzione delle strategie attive e passive.

### 3.0 ROBUSTEZZA E MODALITA' DI COLLASSO

Come già detto nel paragrafo precedente, le strutture devono essere progettate in modo che, in caso di azioni eccezionali, il sistema strutturale principale possa sopportare danneggiamenti locali senza subire un collasso totale, mostrando perciò un degrado delle prestazioni di resistenza proporzionale alla causa che lo ha generato [6].

Nella Figura 2 sono evidenziate gli attributi che una costruzione può possedere, ovvero le sue qualità strutturali: tra queste si può considerare per esempio la resistenza. Si prende quindi in considerazione la resistenza di due strutture (a) e (b) all'aumentare del grado di danneggiamento strutturale. Il grafico mostra che la struttura (b), se integra, è meno resistente della struttura (a); tuttavia è più robusta perché all'aumentare del danno la sua resistenza si mantiene abbastanza elevata, laddove la resistenza della struttura (a) invece diminuisce fortemente [6].

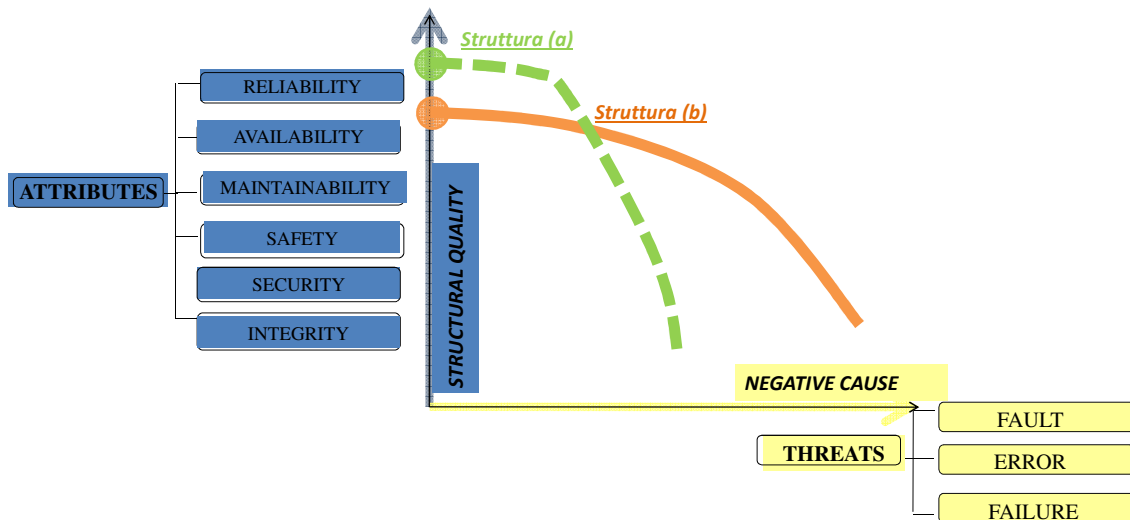


Figura 2. Curva resistenza-danno.

Il requisito di robustezza può essere raggiunto essenzialmente attraverso un'organizzazione degli elementi strutturali che mantenga resistenza e stabilità allo schema principale attraverso un trasferimento dell'azione da qualunque regione strutturale danneggiata a quelle vicine: ciò può essere raggiunto fornendo sufficiente continuità, duttilità, iperstaticità, delle parti che compongono la struttura.

In questo modo, si dovrà pertanto evitare la diffusione del danneggiamento da una regione limitata della struttura a una parte rilevante o addirittura a tutto organismo strutturale, secondo la cosiddetta modalità di

collasso progressivo. Il collasso progressivo è caratterizzato dalla perdita della capacità portante di una porzione relativamente piccola della struttura, che innesci il collasso di una porzione adiacente della struttura fino ad estendersi con un effetto domino a tutta la struttura o a gran parte di essa [19]. Tale modalità di collasso, e in generale la propagazione del danno, sarà raggiunto anche attraverso opportuna compartimentazione dell'organismo strutturale.

Quest'ultima osservazione è espressiva perché indica due strategie per ottenere la robustezza strutturale [4]. Tali strategie, in un certo senso una duale dell'altra, consistono:

- nell'aumentare la connessione delle varie parti strutturali, introducendo un elevato grado di continuità, in modo che le azioni si possano trasferire dalla parte collassata a quelle adiacenti, ovvero la costruzione abbia al suo interno una ridondanza di percorsi atti a trasmettere l'azione. Un'elevata connessione strutturale, a seguito della perdita o del fallimento di un elemento, consente una buona redistribuzione degli sforzi su tutti gli elementi restanti.
- nel suddividere la costruzione in compartimenti, in modo che il collasso di una parte della struttura non si propaghi alle parti adiacenti [7].

Una forma di strategia di progetto particolarmente interessante per strutture soggette a incendio è quella presentata da O'Meagher et al. (1992) [8]. In tale contributo è infatti evidenziata l'importanza di garantire modi di collasso favorevoli (implosivi), come quello illustrato al centro della Figura 4. Si osserva come, in questo caso, le costruzioni adiacenti non vengono in nessun modo coinvolte rimanendo così in condizioni di sicurezza.

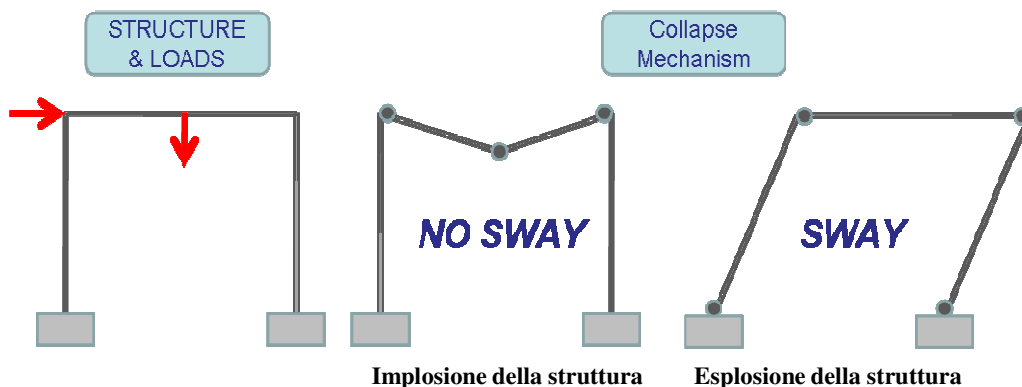


Figura 4. Modalità di collasso strutturale: implosivo-favorevole, esplosivo-non favorevole [9].

Da questo semplice esempio si nota come garantire la sicurezza di una struttura soggetta all'azione eccezionale dell'incendio consista non solo nella verifica di resistenza sviluppata con l'opportuno scenario di carico, ma anche nella simulazione del collasso per giudicarne le modalità. In questo senso, la mera verifica dei singoli elementi strutturali attraverso l'individuazione delle combinazioni di carico previste negli Stati Limite non appare sufficientemente adeguata a garantire la sicurezza strutturale. Bisogna, infatti, cercare di essere in grado di giudicare il tipo di collasso, cosa che può essere fatta solo con una corretta modellazione del problema e quindi con l'uso di analisi contenenti tutte le non linearità che il problema richiama [4].

#### 4.0 CASI APPLICATIVI

Si riportano di seguito due casi applicativi, aventi differenti schemi statici e che proprio per questo consentono di fare considerazioni che significative riguardo la robustezza strutturale, la ridondanza, l'iperstaticità e gli eventuali percorsi alternativi di carico delle due strutture.

La prima struttura è un capannone industriale, soggetto a riabilitazione, di dimensioni in pianta di 33x65 m e dimensione in elevazione di 13 m (Figura 5). Tale struttura, destinata alla manutenzione di macchine speciali e quindi con un alto fattore di rischio incendi, si presenta con una geometria relativamente complessa. L'edificio è isolato ed è dotato di una copertura con struttura reticolare. Sono presenti sei elementi verticali

composti da un blocco di calcestruzzo alla base, da cui partono i profilati in acciaio che costituiscono le colonne [10], [11].

Il secondo esempio è rappresentato da un ponte di acciaio con struttura reticolare avente geometria assimilabile al ponte I35-W, collassato nel Mississippi nel 2007 a causa di un errore progettuale. Una considerazione interessante da fare è che le normative considerano un'azione eccezionale alla volta trascurando in questo modo l'ipotesi di azioni accidentali concomitanti o concatenate [12], [13]. Quest'ultimo esempio è illustrativo invece di situazioni accidentali in cui l'incendio non è un'azione statisticamente indipendente, bensì conseguente ad un'altra azione accidentale quale l'esplosione. Si parla in questo caso di scenari *multi-hazard* che sono inopinatamente non esplicitamente considerati dalle vigenti normative.

#### 4.1 Capannone industriale

Per accertare la sicurezza all'incendio della struttura, si ipotizzano tre scenari di incendio localizzati in zone di circa  $50 \text{ m}^2$ , approssimabili cioè al 2,5% della superficie totale della struttura. Si ricorda che per incendio localizzato si intende un focolaio di incendio che interessa una zona limitata dell'intera struttura, nella quale lo sviluppo di calore rimane concentrato in prossimità degli elementi strutturali posti nell'intorno del focolaio. L'azione dell'incendio è modellata applicando agli elementi pensati coinvolti la curva nominale ISO834 [14].

Nello specifico, la scelta degli scenari di incendi significativi per il caso in esame, è ricaduta sull'individuazione di tre zone, come illustrato in Figura 5: il primo scenario (A) suppone l'incendio localizzato nella zona esterna, coinvolgendo anche le colonne di bordo; il secondo (B) è localizzato nella zona centrale della campata senza coinvolgimento delle colonne; il terzo scenario (C) concentra l'incendio nella zona centrale dell'edificio, coinvolgendo anche le colonne centrali [15].

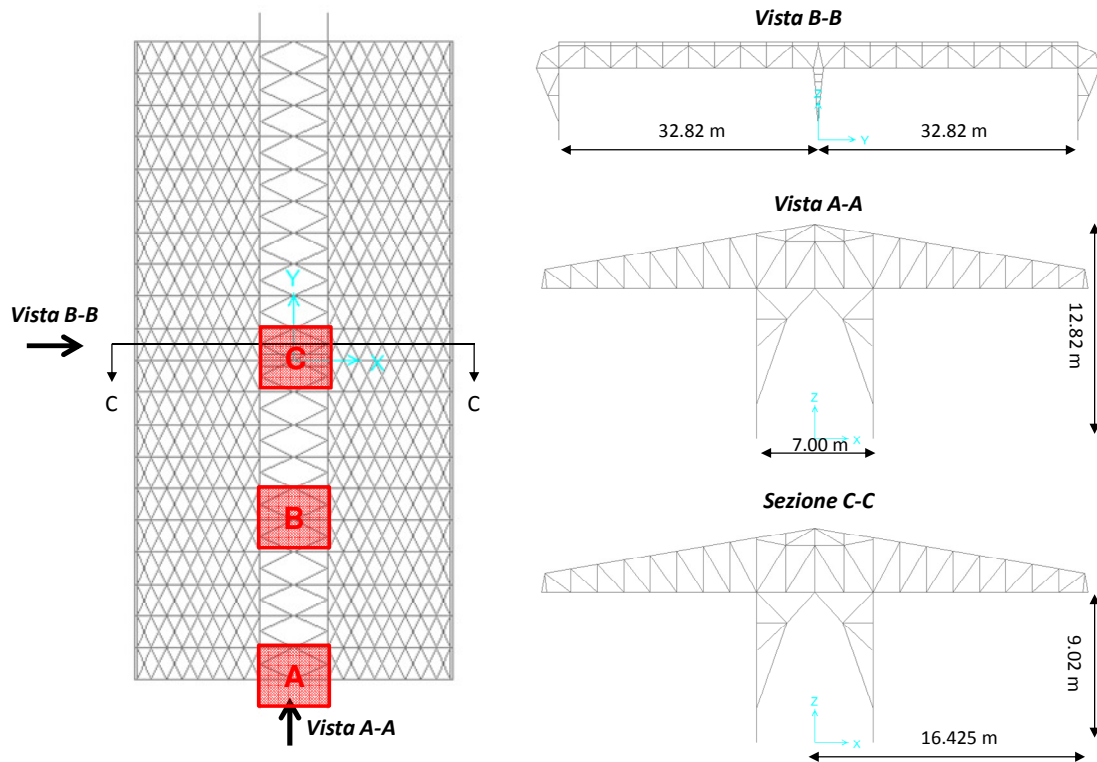


Figure 5. Geometria dell'edificio e localizzazione dei tre scenari di incendio.

Particolare attenzione deve essere data allo schema statico del presente edificio, che è composto da una copertura reticolare fortemente iperstatica, come mostrato in Figura 6. E' noto infatti come la ridondanza di elementi favorisca la creazione di percorsi alternativi di carico in caso di crisi di alcuni elementi. A tal

proposito si può pensare di condurre alcune considerazioni per ciò che concerne il raggiungimento del collasso strutturale. E' possibile, infatti, affermare che il collasso di un'asta della copertura, sia senza dubbio un aspetto localmente importante, che però non compromette necessariamente il comportamento globale dell'intero edificio. E' bene quindi distinguere il collasso locale di alcune aste dal collasso o dalla perdita di resistenza di elementi critici portanti, come ad esempio le colonne, che non presentano ridondanza nella struttura in esame. Il collasso è quindi valutato in funzione del comportamento globale della struttura, attribuendo particolare importanza agli elementi principali più resistenti.

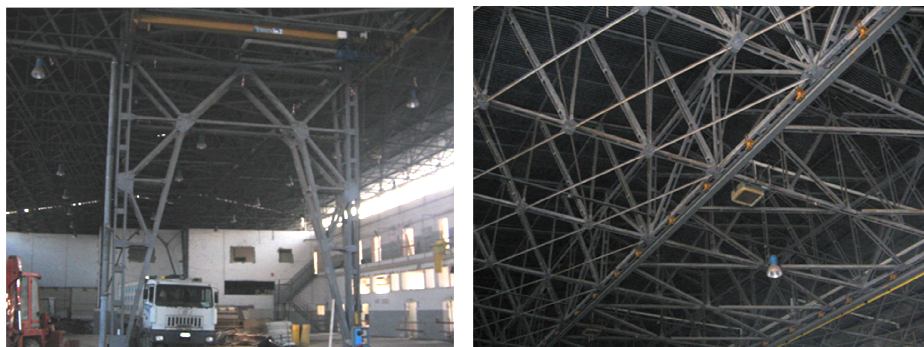


Figure 6 Immagini della struttura.

Dai risultati di analisi non lineari [16], [17], [18] (la Figura 7 mostra le deformate per i tre scenari di incendio considerati e l'andamento di alcuni spostamenti massimi dei nodi coinvolti dall'azione dell'incendio) si riscontra che, come inizialmente ipotizzato, lo scenario B, che non coinvolge elementi verticali, non si ripercuote sulla sicurezza globale della struttura.

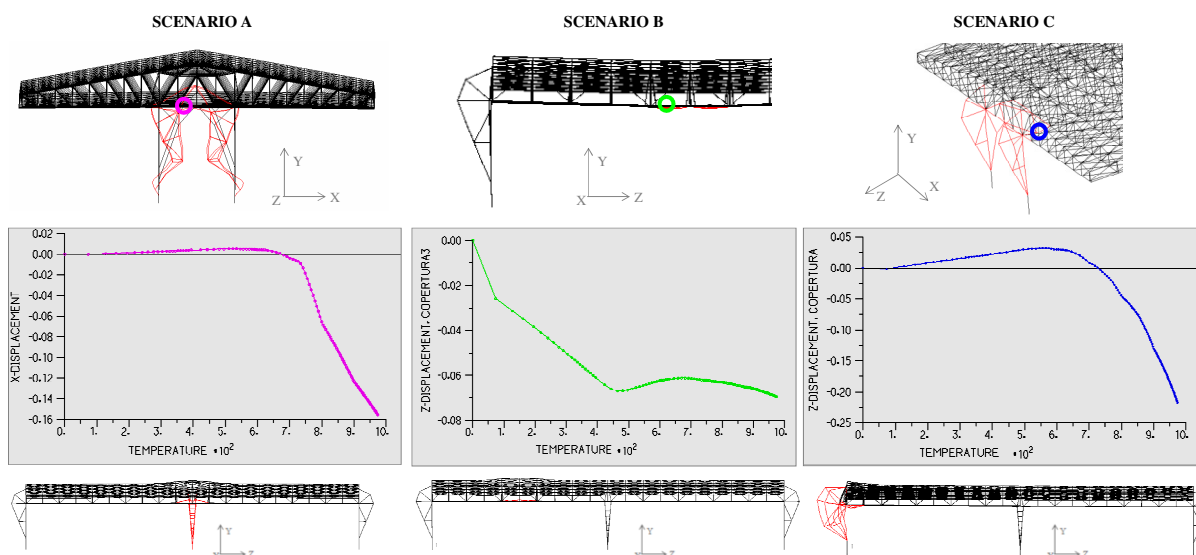


Figure 7. Risultati dell'analisi non lineari.

Quanto detto è vero nel caso in cui il carico incendio è pensato come localizzato: in effetti, questa ipotesi rappresenta un'approssimazione, che non permette di tenere conto di alcuni aspetti importanti. Infatti, al fine di seguire l'approccio ingegneristico al problema della sicurezza antincendio in maniera più realistica, si determina la curva naturale di incendio dovuta all'incendio di un elicottero, mediante il codice FDS [18]. Dalla Figura 8 si nota come tale curva ricada tra le due curve nominali ISO834 e degli idrocarburi. Per quanto detto in precedenza, la considerazione dello scenario B non evidenzia grandi problemi a livello di sicurezza globale della struttura, poiché lo scenario d'incendio era localizzato e non considerava la trasmissione del calore agli elementi non interessati dalla zona



d'incendio. La Figura 9 mostra tuttavia che nel caso la trasmissione del calore venga opportunamente considerata nello scenario B, le colonne raggiungono temperature che superano i 100 °C (temperatura oltre la quale il modulo di elasticità dell'acciaio inizia a diminuire) ma anche i 400 °C, oltre i quali non solo si ha una riduzione della rigidezza dell'acciaio ma anche un abbattimento della tensione di snervamento e quindi della resistenza del materiale. Non considerare tale aspetto porta a trascurare spostamenti delle colonne che possono effettivamente compromettere la sicurezza strutturale. La parte bassa della Figura 9 mostra l'andamento dello spostamento in direzione x di un nodo delle colonne.

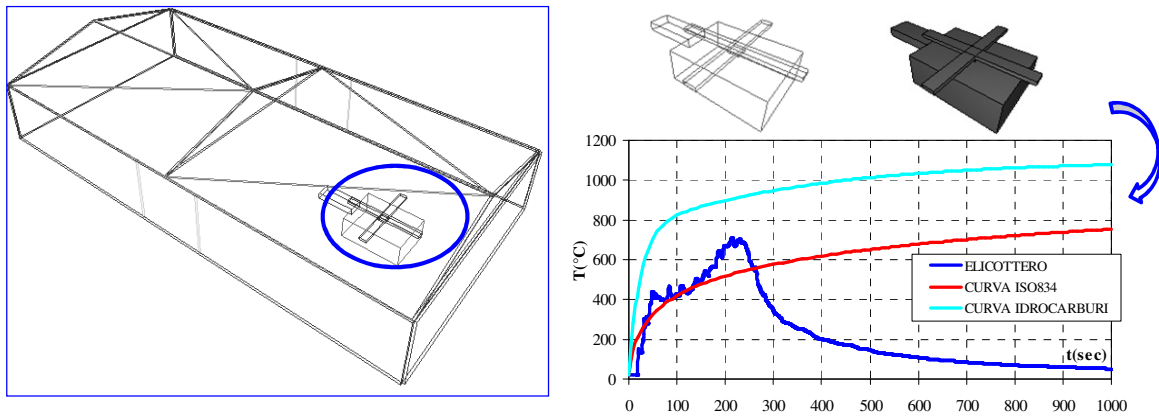


Figure 8. Modellazione dell'azione mediante FDS e confronto tra curve nominali e naturali di incendio.

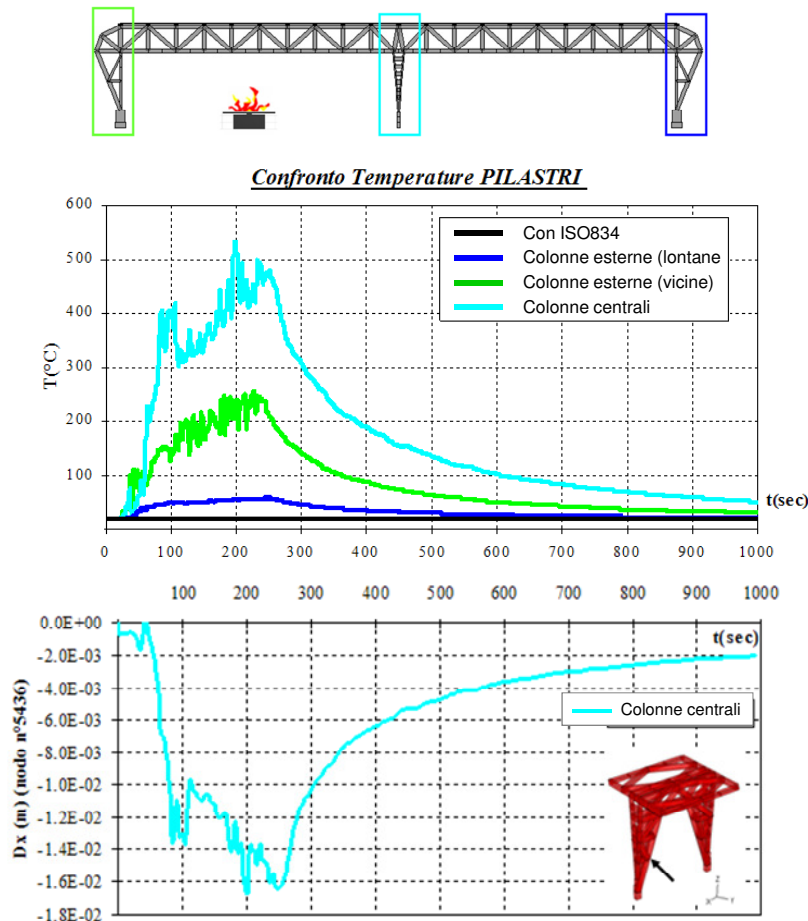


Figure 9. Andamento delle temperature in corrispondenza degli elementi verticali.



Un altro aspetto che la modellazione dell'azione permette di tenere in considerazione è la presenza delle eventuali aperture ed anche la presenza di persone che possono indurre cambiamenti dello scenario d'incendio durante il suo sviluppo.

A tal proposito in Figura 10 si riportano le curve temperatura-tempo ottenute per tre scenari diversi: nel caso 1 si considera chiuso il compartimento in cui divampa; nel caso 2 invece si considera il compartimento chiuso nei primi cinque minuti d'incendio, tempo dopo il quale vengono aperte due aperture laterali a causa dell'arrivo dei vigili del fuoco; nel caso 3 le aperture sono considerate aperte sin dall'inizio dell'incendio. Nell'ipotesi di ambiente stagno, che non consenta pertanto alcun ingresso d'aria, la combustione si blocca dopo un certo tempo. Con il procedere della combustione infatti la quantità di ossigeno presente nell'edificio diminuisce e pertanto l'incendio non potrà più liberamente svilupparsi, come si vede dalla tratto discendente della curva temperatura-tempo del caso 1. La curva invece inerente al caso 2 ci permette di mettere in luce un ulteriore fenomeno che può verificarsi frequentemente nel caso di incendio in edifici con aperture. È pertanto necessario mostrare attenzione nell'entrare in un locale dove si è sviluppato un incendio in condizioni di carenza di ossigeno, poiché i prodotti di pirolisi incombusti possono dar luogo ad improvvise fiammate (*vent fires*) in corrispondenza delle aperture dalle quali affluisce l'aria necessaria a sostenerne la combustione, come mostrato in Figura 11.

Oltre al fenomeno del *vent fires* la modellazione dell'azione mediante modelli di campo permette inoltre di fare considerazioni riguardo la propagazione dei fumi, l'emissione di sostanze nocive. La Figura 10 mostra il propagarsi del fumo e delle fiamme al passare del tempo: in tale figura è possibile notare anche il *ceiling jet*, fenomeno per il quale una volta che la fiamma arriva al soffitto, i prodotti di combustione iniziano a propagarsi orizzontalmente, formando allo stesso tempo uno strato sottostante al soffitto (*upper layer*).

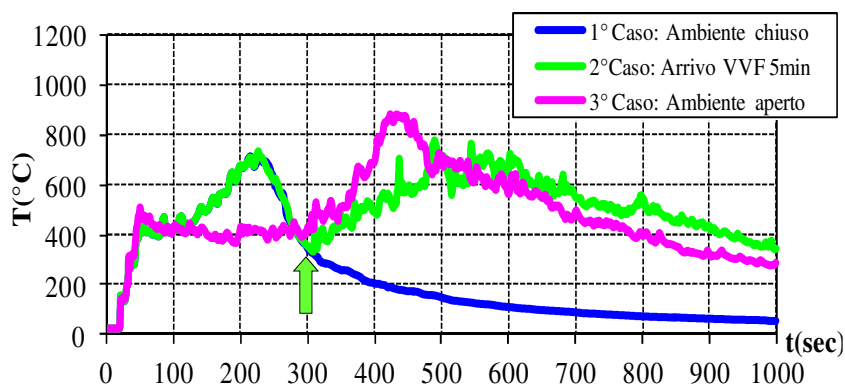


Figure 10. Curve naturali Temperatura-tempo per tre differenti casi.

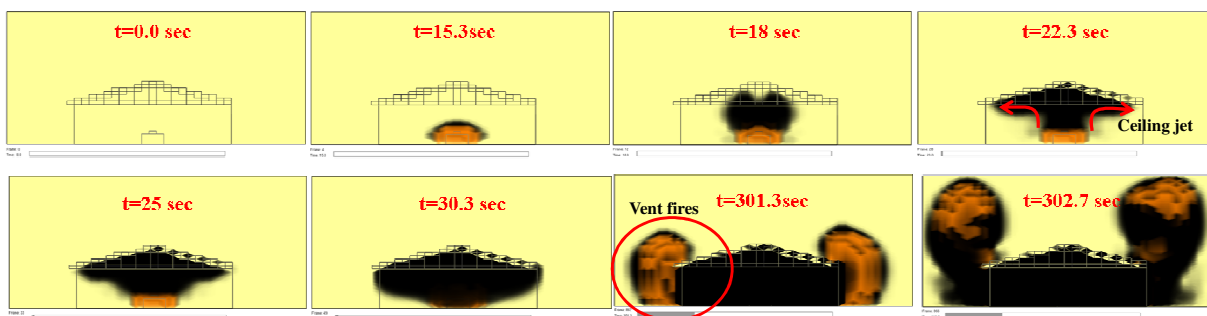


Figure 11. Propagazione delle fiamme e dei fumi attraverso il codice a volumi finti FDS [18].

## 4.2 Ponte in acciaio con struttura reticolare

Un caso diverso, inerente tuttavia al ruolo chiave che la robustezza ha nel caso di azioni eccezionali quali incendio ed esplosioni, è dato da analisi condotte su di un ponte in acciaio con travature reticolari di tipo Warren con elementi verticali.

Si considera il caso del ponte I-35W in Minnesota, collassato nel 2007 a seguito di un errore di progettazione e classificato dalla FHWA nel 2008 come “*fractural critical system*” insieme ad altri 465 ponti in USA [19]. Per tali ponti il collasso di un singolo elemento può essere fatale in termini di capacità portante e sicurezza strutturale.

Focalizzando l’attenzione su una particolare zona del ponte, si sono svolte analisi non lineari considerando quattro ipotetici scenari di danno dovuti a un’esplosione (Figura 12). Il danno considerato prevede che un elemento strutturale sia istantaneamente rimosso dalla struttura, non conferendo più alcun contributo in termini di capacità portante.

La Figura 13 mostra i risultati di analisi dinamiche non lineari transienti riferite allo spostamento verticale del nodo 40 nel caso di scenario 1, scenario che prevede la rimozione dell’elemento obliquo [13].

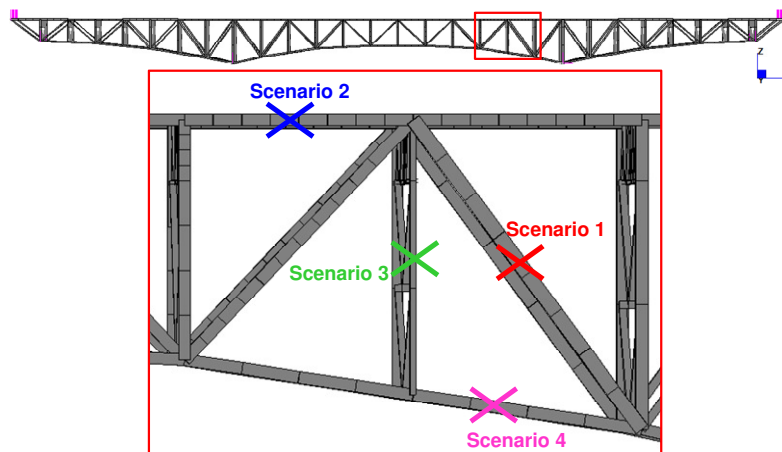


Figura 12. Quattro scenari di danno considerati.

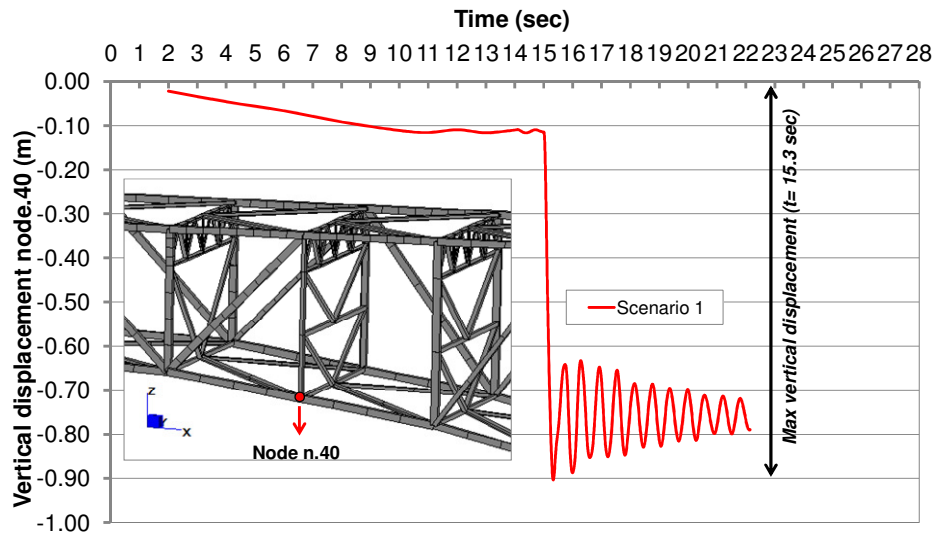


Figura 13. Spostamento verticali in funzione del tempo.

La Figura 14, riporta gli spostamenti verticali dei nodi del corrente superiore della travatura reticolare ovest. Da tale figura si identifica facilmente che lo scenario1, che coinvolge la rimozione l’elemento obliquo della struttura reticolare è quello che porta al collasso del ponte, in quanto considera la rimozione di un elemento critico della struttura. Gli altri scenari, invece, pur conferendo una maggiore flessibilità rispetto alla situazione nominale (scenario 0), non generano il collasso globale della struttura.

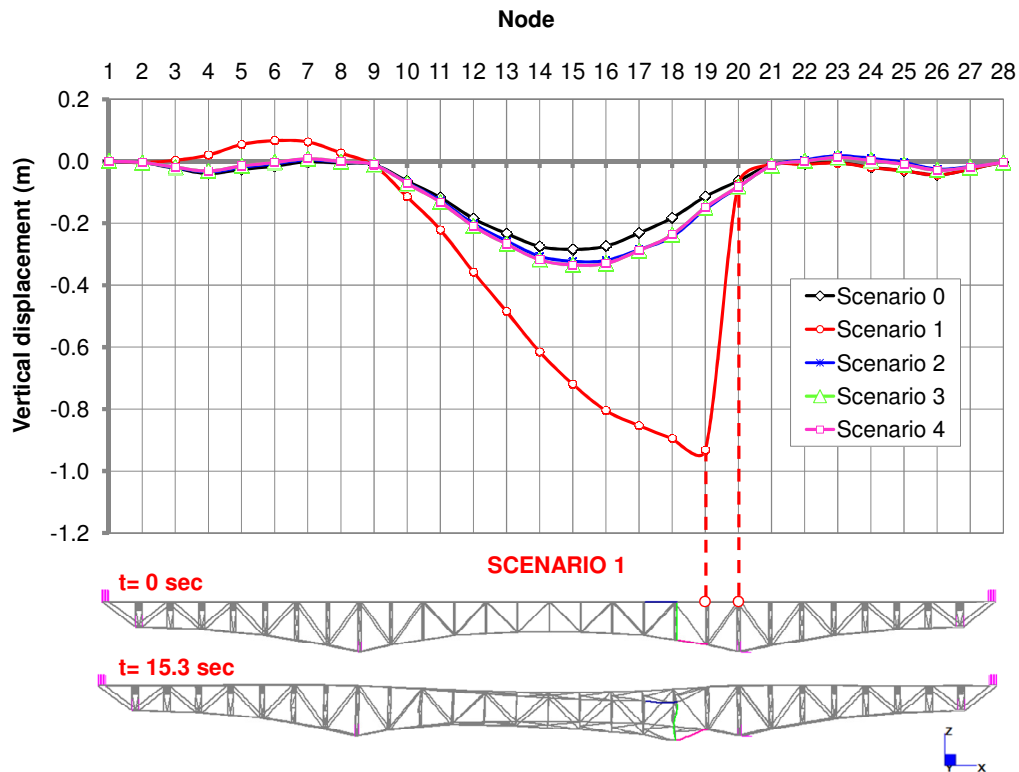


Figura 14. Spostamenti verticali massimi dei nodi del corrente superiore.

Alla struttura così danneggiata è poi applicato uno scenario di incendio che coinvolge alcuni elementi della travatura ad Ovest, vedi Figura 15. Conducendo analisi non lineari transienti, è possibile determinare la temperatura critica per il ponte danneggiato secondo gli scenari di danno in precedenza descritti. Questo caso ha una certa rilevanza in termini di probabilità di accadimento: si può, infatti, immaginare il ponte investito da un veicolo, come avvenuto recentemente in California, la cui esplosione ha poi generato un incendio che ha portato al crollo dell'impalcato.



Figura 15. Collasso del San Francisco-Oakland Bay Bridge, (<http://www.sfgate.com/>)

Dalla Figura 16 è possibile affermare che, se l'incendio non fosse stato preceduto dall'azione dell'esplosione (scenario 0), il ponte in questione avrebbe avuto una temperatura pari a  $200^{\circ}\text{C}$  circa, che è all'incirca la temperatura trovata nel caso di scenario 3 e 4 seguiti da incendio. Nel caso di scenario 2 seguito da incendio, si ha un incremento di temperatura dovuto al fatto, che l'aver tolto l'elemento del corrente superiore orizzontale consente al codice di calcolo STRAUS7 di continuare l'analisi andando quindi oltre il limite di snervamento dettato dalla sezione di quello elemento.

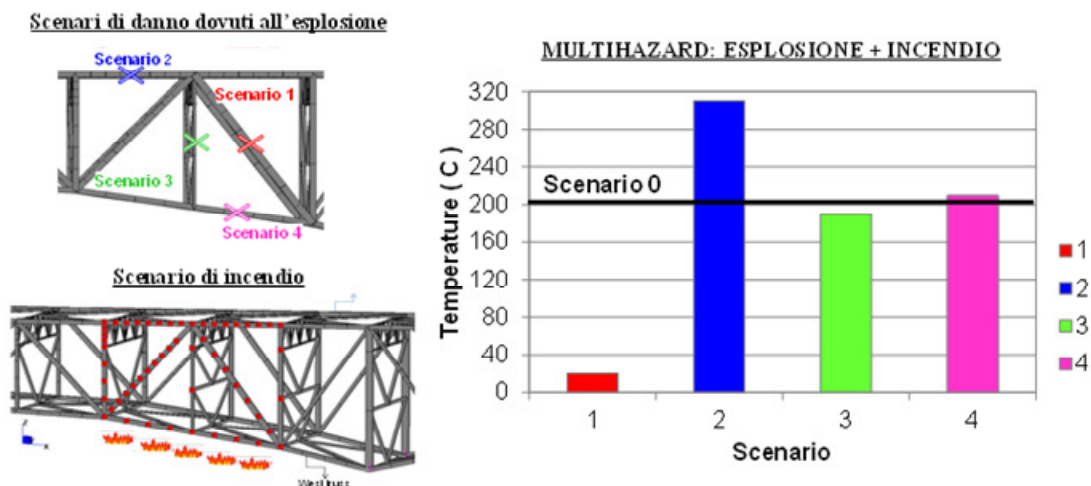


Figura 16. Risultati in termini di temperature critiche.

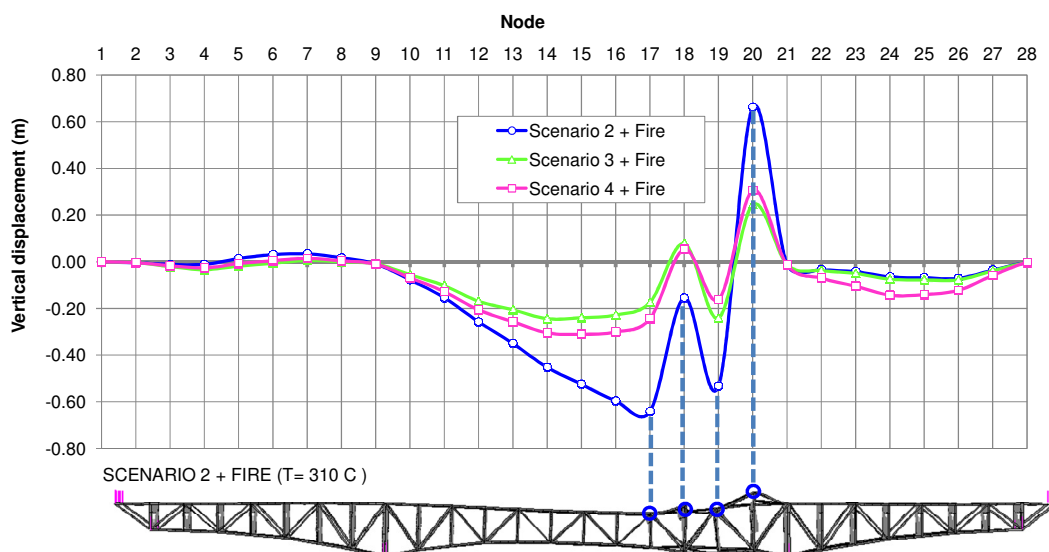


Figure 17. Deformata secondo lo scenario 2 per T= 310 °C.

## CONCLUSIONI

Il reale comportamento delle strutture in acciaio soggette ad incendio è piuttosto complesso e pertanto la loro completa valutazione deve essere ottenuta tenendo sempre presente il comportamento globale della struttura stessa. La verifica della capacità prestazionale e la valutazione di un eventuale collasso strutturale richiedono quindi da parte del Progettista particolare preparazione ed esperienza. La definizione a priori del collasso di una generica struttura, dal punto di vista di un approccio prestazionale, è legata a molteplici aspetti: tra questi di particolare importanza sono quelli legati alla modellazione sia termica che strutturale del problema in esame [20]. Nel presente articolo sono state condotte analisi non lineari su due tipologie di costruzioni esistenti. Dai risultati di tali analisi si sono tratte alcune considerazioni riguardanti gli schemi statici coinvolti. In entrambi i casi è stata data importanza all'individuazione degli elementi critici della costruzione, ribadendo il concetto di robustezza strutturale e di ridondanza. Nel primo caso poi l'aspetto legato alla corretta modellazione dell'azione incendio e la relativa propagazione del calore ha messo in evidenza come la presenza delle eventuali aperture ed anche la presenza di persone possano generare cambiamenti dello scenario durante lo sviluppo dell'incendio e dare risultati differenti in termini di sicurezza strutturale della struttura. Nel secondo caso applicativo invece, si è introdotto il concetto di *multi-hazard*. Il fatto che le normative non considerino la possibilità di accadimento di più eventi accidentali in una

costruzione è, di fatto, un aspetto importante, come anche testimoniato da eventi recenti: si veda il caso del camion che, in California, a seguito dell'urto su la pila del ponte, ha poi generato un incendio che ha portato al collasso dell'impalcato, come illustrato in Figura 15.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano sinceramente per il continuo supporto e gli importanti spunti di riflessione i colleghi Ingg. Mauro Caciolai e Claudio De Angelis del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco; i colleghi del gruppo di ricerca di Tecnica delle Costruzioni presso la Facoltà' di Ingegneria della Sapienza di Roma([www.francobontempi.org](http://www.francobontempi.org)); l'Ing. Perin per il codice di calcolo STRAUS7 utilizzato per le analisi non lineari.

## RIFERIMENTI

- [1] D.M. 14/01/2008. (Ministero Infrastrutture e Trasporti). Norme Tecniche per le Costruzioni, 2005.
- [2] Strategie per il conseguimento della robustezza strutturale: connessione e compartimentazione. Giuliani L., Wolff M., Proc. of the 3rd national congress on collapse and reliability of civil structures (CRASC'06), "Università degli Studi di Messina", Messina, Italy, 20-22 April 2006.
- [3] Structural integrity: robustness assessment and progressive collapse susceptibility .Giuliani L., PhD tesi all'Università' di Roma Sapienza, advisor Prof. F. Bontempi, Co-advisor Prof. U. Starrosek, Roma 2008, [http://www.francobontempi.org/pdf/tesidott/tesi\\_dottorato\\_giuliani.pdf](http://www.francobontempi.org/pdf/tesidott/tesi_dottorato_giuliani.pdf).
- [4] Il ruolo delle strutture nella protezione passiva contro l'incendio. Bontempi F., Crosti C., Giuliani L., Rivista Antincendio, Agosto 2008.
- [5] ISO 13387 Fire safety engineering – Part 1: The application of fire performance concepts to design objectives.
- [6] Robustezza strutturale. Bontempi F., Atti del Convegno CRASC'06, Università degli Studi di Messina, Messina, 20-22 Aprile 2006.
- [7] Progressive Collapse of Structures, Starossek U., Thomas & Telford Ed., London 2009.
- [8] Design of Single Storey Industrial Buildings for Fire Resistance. O'Meagher, A.J., Bennets, I.D., Dayawansa, P.H., Thomas, I.R., Journal of the Australian Institute of Steel Construction, Vol. 26, No. 2, pp. 2-17, Maggio, 1992
- [9] Advanced numerical analyses for the assessment of steel structures under fire. Gentili F., International Journal of Lifecycle Performance Engineering, Special Issue on Fire Safety Design and Robustness Considerations in Structural Engineering, Inderscience, in press, 2012.
- [10] Basi della progettazione strutturale antincendio con approccio prestazionale: Applicazioni. Bontempi F., Crosti C., Giuliani L. Petrini F., Rivista Antincendio, Giugno 2009.
- [11] Costruzioni in acciaio secondo l'approccio ingegneristico di progetto. Bontempi F., Crosti C., Rivista Antincendio, Maggio 2008.
- [12] Risk consistency and synergy in multi-hazard design. Crosti C., Duthinh D., Simiu E., ASCE's Journal of Structural Engineering. Vol.3. No.8. August 2011.
- [13] Structural response of bridges to fire after explosion. Crosti C., Olmati P., Gentili F., Six International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS2012), Villa Erba, Lake Como, Italy, July 8-12. In press.
- [14] Eurocodice 3. Design of steel structures, Part 1.2: General rules. Structural fire design. 2002.
- [15] Performance assessment of steel structures subject to fire action. Crosti C., Bontempi F., (2008), CTS 2008. Athens. September, 2- 5.
- [16] STRAND7/STRAUS7, <http://www.hsh.info/>.
- [17] ADINA, [www.adina.com](http://www.adina.com)
- [18] FDS, <http://fire.nist.gov/fds/>
- [19] Federal Highway Administration (2009) "Load rating guidance and examples for bolted and riveted gusset plates in truss bridges" FHWA-IF-09-014, Washington, D.C. 20590.
- [20] Structural Analysis of Steel Structures Under Fire Loading. Crosti C., Acta Polytechnica. Vol. 49, No. 1/2009.